

陈琪, 杨青霞, 王潘潘, 刘俊雁, 廖雨辰, 何恒果, 涂培, 吴彦. 九寨沟国家级自然保护区森林秋季景观美学质量及其空间分布格局[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (5): 1117-1124

Chen Q, Yang QX, Wang PP, Liu JY, Liao YC, He HG, Tu P, Wu Y. Aesthetic quality and spatial distribution pattern of autumn forest landscapes in Jiuzhaigou National Nature Reserve [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2023, 29 (5): 1117-1124

九寨沟国家级自然保护区森林秋季景观美学质量及其空间分布格局

陈琪^{1,2} 杨青霞³ 王潘潘³ 刘俊雁^{1,2} 廖雨辰² 何恒果¹ 涂培⁴ 吴彦^{2✉}

¹西华师范大学生命科学学院 南充 637002

²中国科学院成都生物研究所 成都 610041

³九寨沟国家级自然保护区管理局 阿坝 623402

⁴成都市植物园 成都 610083

摘要 景观美学质量评价是森林资源管理的重要内容, 量化分析美学质量及其空间布局对开展森林营建工作具有重要意义. 为充分挖掘九寨沟国家级自然保护区森林植被的美学价值, 结合德尔菲法和心理物理学方法, 基于森林群落优势树种的生物学特性, 从色彩、树形、叶形3个方面特征总共选取10个指标构建基于物种属性的美学质量评价体系, 进而对研究区主要的8种乔木树种进行美学质量评价, 并将其按从高到低划分为I-IV等级. 在此基础上, 叠加森林植被空间数据构建全域范围内的景观美学质量空间分布格局, 探讨景观美学质量与地形因子(海拔、坡度和坡向)的关系. 结果表明: (1) 乔木树种美学质量由高到低排序为红桦(0.784 6) > 辽东栎(0.753 7) > 山杨(0.720 3) > 四川红杉(0.622 2) > 油松(0.570 1) > 云杉(0.472 9) > 冷杉(0.467 1) > 方枝柏(0.405 4); (2) 保护区内植被的美学质量在空间分布上表现为聚集分布, 沿道路两侧及水域周围区域的美学质量较高; (3) 美学质量在不同海拔、坡度和坡向上的分布均有显著性差异($P < 0.01$). 中低海拔范围(2 200-3 200 m)的美学质量较高, 斜坡到急坡范围内的美学质量相比平缓坡较高, 阳坡上的美学质量也要略大于阴坡. 可见, 秋季的九寨沟森林景观美学价值在树种类型和空间分布均存在显著差异, 建议注重较高美学质量树种保护与管理的同时也重视空间布局规划, 如在美学质量高的区域增设旅游步道或扩宽景观视域范围, 进一步提升景区的森林景观美学服务价值. (图5表3参36)

关键词 美学质量; 景观评价; 地形因子; 空间分布; 九寨沟

Aesthetic quality and spatial distribution pattern of autumn forest landscapes in Jiuzhaigou National Nature Reserve

CHEN Qi^{1, 2}, YANG Qingxia³, WANG Panpan³, LIU Junyan^{1, 2}, LIAO Yuchen², HE Hengguo¹, TU Pei⁴ & WU Yan^{2✉}

¹ School of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637002, China

² Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Chengdu, Chengdu 610041, China

³ Jiuzhaigou National Nature Reserve Administration, Aba 623402, China

⁴ Chengdu Botanical Garden, Chengdu 610083, China

Abstract Aesthetic quality (AQ) is a crucial ecosystem service of forests, and the assessment of AQ and its spatial patterns is important for forest management. In this study, we developed an innovative methodology combining the Delphi and psychophysical methods for the spatial assessment of AQ in the Jiuzhaigou National Nature Reserve (*hereafter* Jiuzhaigou). Based on the biological characteristics of the dominant tree species, 10 indicators (including color, canopy architecture, and leaf form) were selected to quantitatively evaluate the AQ assembly. Based on this method, autumn AQ was assessed and eight main tree species in Jiuzhaigou were divided into four classes (I–IV), and the spatial distribution pattern of AQ was analyzed. Moreover, the relationship between AQ and topographic factors (elevation, slope, and aspect) was investigated. The results showed that: (1) the AQ of each tree species was *Betula albosinensis* (0.784 6) > *Quercus liaotungensis* (0.753 7) > *Populus davidiana* (0.720 3) > *Larix mastersiana* (0.622 2) > *Pinus tabulaeformis* (0.570 1) > *Picea asperata* (0.472 9) > *Picea asperata* (0.467 1) > *Sabina saltuaria* (0.405 4); (2) the spatial distribution of AQ was uneven, and

收稿日期 Received: 2022-08-01 接受日期 Accepted: 2023-05-17

九寨沟灾后重建科研项目(5132202020000046)、国家重点研发计划项目(2017YFC0505005-1, 2020YFE0203200)、四川省自然科学基金项目(2022NSFC0096)和九寨沟管理局自主科研项目(2022-05)资助 Supported by the Jiuzhaigou Post-Disaster Restoration and Reconstruction Program (5132202020000046), National Key R&D Program of China (2017YFC0505005-1, 2020YFE0203200), Natural Science Foundation of Sichuan (2022NSFC0096), and Scientific Research Project of Jiuzhaigou National Nature Reserve Administration (2022-05)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: wuyan@cib.ac.cn)

higher AQ was found along roadside and watershed areas; and (3) the spatial distribution of AQ was differed significantly ($P < 0.01$) among elevations, slopes, or aspects. Specifically, high AQ was usually found in low- and middle-elevation areas (2 200–3 200 m), and AQ on higher slopes was higher than that on lower slopes. These results demonstrate that the autumn AQ in Jiuzhaigou differs spatially among tree species. We suggest that spatial distribution should be considered when protecting high-AQ tree species; for example, increasing the number of tourist trails or widening areas of scenic spots will help improve AQ.

Keywords aesthetics quality; landscape assessment; topographic factor; spatial distribution; Jiuzhaigou

随着生态文明建设与“两山”发展理念的推进,可持续森林旅游与生态系统服务的联系日益加强^[1]。千年生态系统评估项目将生态系统服务划分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四大类^[2]。其中,森林文化服务能为人类提供景观美学、休闲娱乐以及精神福祉功能^[2]。在这些文化服务中,美学质量最为重要且易于被感知^[2],因而受到越来越多研究学者关注。

森林景观美学研究从19世纪在国外兴起^[3],经过40年的发展形成了公认的四大学派:专家学派(expert paradigm)、心理物理学派(psychophysical paradigm)、认知学派(cognitive paradigm)和经验学派(experiential paradigm)^[3]。国内的景观美学评价的工作起步较晚,早期研究大都采用描述因子法进行现场评判^[3],后期国内学者对森林景观美学评价方法进行了一系列探索,包括对风景林的景观色彩进行量化评价^[4]、引进粗糙集法对景观林评价^[5]、采用模糊数学概念和灰色聚类法等数学方法开展研究^[6-7]。国内外主要通过定性和定量相结合的方法评价生态系统的美学服务价值^[8],而关于量化景观美学质量及其空间制图的研究相对较少^[9]。在景观美学质量评价方法的选择上,国外学者致力于将GIS技术、VR技术、大数据挖掘、模型评价等方法与美学评价相结合进行系统研究^[10-12],而国内学者则主要运用美景度评价、色彩量化等方法在局部区域开展评价^[13-15]。总体来看,相比国外,国内现有研究着重关注小尺度景观美学质量,在全域范围内定量评价森林美学质量并探讨其空间分布规律的研究还鲜见报道。

九寨沟国家级自然保护区奇特的地势和气候形成了其“六绝”独特的景观。其中,彩林作为“六绝”之一,对保护区的生态价值起着至关重要的作用^[16]。然而,关于保护区内森林景观美学质量的定量评估鲜见报道,其美学质量的空间分布格局还尚不清楚。已有研究表明,景观美学依赖于量化景观美学特征感知评估的客观参数和指标^[17]。在心理物理学范畴,认为对特定景观的偏好和吸引力应该建立在景观的生物物理属性中^[12]。鉴于此,我们以九寨沟国家级自然保护区为研究区,基于森林群落优势树种的生物学特性,采用德尔菲法和心理物理学方法有效开展秋季森林景观的美学质量定量评价,并在此基础上结合GIS软件对美学质量进行空间化制图,获得全域范围内美学质量空间布局,揭示更加丰富的评价信息,进而为九寨沟森林资源保护和景观规划工作引入可量化、可操作的评价与应用方法,更好地发挥森林景观的生态服务价值与风景游憩效益,促进景区森林资源的可持续利用和适应性管理。

1 研究区概况

九寨沟国家级自然保护区位于四川盆地向青藏高原的过渡地带(32°54′–33°16′N, 103°46′–104°3′E),面积约

642.97 km²,保护区森林覆盖率达79.61%^[17]。主要的森林植被包括以下8种类型:冷杉林(*Abies faxoniana*)、云杉林(*Picea asperata*)、油松林(*Pinus tabuliformis*)、四川红杉林(*Larix mastersiana*)、方枝柏林(*Sabina saltuaria*)、红桦林(*Betula albosinensis*)、辽东栎林(*Quercus liaotungensis*)、山杨林(*Populus davidiana*) (图1)^[18],这些植物群落类型构成了九寨沟森林景观的主体。

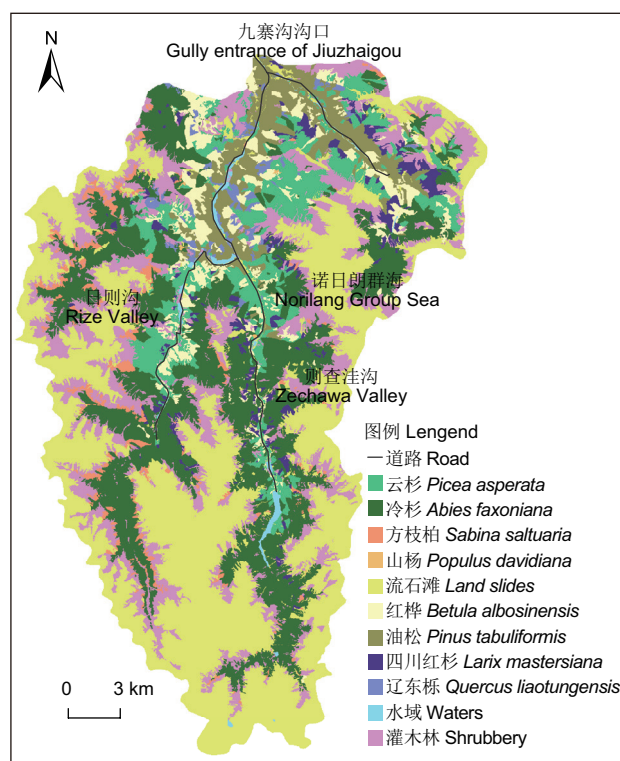


图1 研究区植被类型分布图。

Fig. 1 Distribution of vegetation types in the study area.

2 材料与方法

2.1 指标体系构建

借鉴国内外相关评价方法^[18-19],结合相关领域专家的意见,基于森林群落主要优势乔木树种的生物学特性,构建九寨沟自然保护区乔木树种美学质量评价指标体系。指标体系划分为目标层、准则层和指标层3个层次;以森林景观美学质量为目标层,以叶面特性、树形特征、色彩特征3个维度为准则层,指标层包含的指标因子分别为叶形(C_1)、叶面积(C_2)、枝叶比(C_3)、树形(C_4)、树干清晰度和(C_5)、冠幅(C_6)、色相(C_7)、亮度(C_8)、饱和度(C_9)、变色时长(C_{10}) (表1)。

各指标的权重通过Delphi专家咨询法确定^[20]。具体步骤如下:将评价指标制成多层次指标体系表格后发给20位专家

进行打分, 每位专家根据其重要性对每个指标或亚指标进行赋分, 最后采取公式计算各项指标的权重值(表1)。公式如下:

$$a_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^m b_i}, E = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$$

式中: n 为参加评价指标赋分专家的人数, a_i 为某位专家对该项指标的赋分权重, b_i 为某位专家对该项指标的赋分, m 为景观美学评价指标数, E 为该指标的最终权重。

2.2 评价指标可测性及量化值获取方式

本研究综合运用色彩量化、文献查阅及问卷调查等方法确定各评价指标的量化值。考虑到秋季彩叶树种的美学质量, 我们在九寨沟官网(<https://www.jiuzhai.com/>)、中国植物图像库(<http://www.plantphoto.cn/>)、中国国家地理网(<http://www.dili360.com/>)等官方网站上选取秋季时期拍摄的树种照片, 用以色彩量化和问卷调查。基于能够在官方网站上展示的图片都认为其具有较高的美学质量, 因而从这些网站上选取图片能够体现该树种的最大美学质量, 从而对不同树种间美学质量进行比较。筛选图片时注意选取画质清晰度高的照片, 并尽可能增加选取的照片数量, 以避免样本数量少而带来的误差。此次研究共收集了280余张照片, 选取其中具有代表性的139张用作量化材料。其中, 彩林树种(四川红杉、红桦、山杨、辽东栎)照片各选取了20张, 云杉、冷杉和油松各选取15张照片, 方枝柏选取了14张照片。

2.2.1 色彩指标 对于色彩要素的量化, 将获取的图片导入Photo shop CC2018软件, 去除前景、背景等干扰因素后将图片导入色彩辅助软件Color impact 4中, 获取叶片的HSB值(H: 色相; S: 饱和度; B: 亮度), 对叶片色彩进行量化分析。其中, 秋色叶树种变色区间主要分布在黄色系和橙色系之间,

而常绿树种叶色基本处于叶绿色范围内。色彩量化具体结果见表2。

2.2.2 形态学指标的量化 形态学指标(冠形、叶形和树干清晰度)的量化数据主要通过问卷调查的方式获得。依据郑万钧冠形分类系统^[21], 将冠形分为卵形、广卵形、盘伞形、圆锥形4种, 根据问卷调查结果按从低到高给4种冠形分别赋予1、2、3、4分; 根据李扬汉叶形分类系统^[22], 将叶形分为卵形、倒卵形、条形等3种叶形, 根据问卷结果给将3种叶形按从低到高分别赋予1、2、3分; 将树干清晰度分为不清晰、较清晰、清晰3种, 依次赋予1、2、3分。确定后的形态学指标具体量化结果见表2。

2.2.3 其余指标 变色期时长、冠幅、叶面积、枝叶比等定量化评价指标, 通过查阅文献^[18, 23-25]获取, 具体结果见表2。

2.3 问卷调查

为了解公众对每个指标的偏好程度, 采用电子调查问卷的方式(调查问卷链接: <https://www.wjx.cn/vm/OtgFwxr.aspx#>), 使用照片代替真实场景, 通过公众对样本照片的喜爱程度进行排序从而得到其评价。问卷内容包括: (1) 对定性指标冠形、叶形打分; (2) 确定指标性质。其中, 色相、枝叶比为逆指标, 饱和度、亮度、变色期时长、冠形、叶形、树干清晰度、冠幅、叶面积为正指标。此次调查共发放问卷577份, 有效问卷532份, 问卷调查人群基本信息见表3。采用 α 信度系数法对问卷进行可靠性分析, 发现可靠性统计 α 系数为0.776, 说明该问卷信度较强, 其结果可供后续分析使用^[16]。

2.4 标准化处理

由于各指标单位量纲不同, 不能简单将指标量化数值作为各指标的美学质量。为消除这种影响, 采用线性比例法^[26]对评判结果进行标准化处理。得到不同景观特征的所有样本

表1 森林乔木树种美学质量评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of aesthetic quality of forest tree species

目标层 Object layer	因素层 Factor layer	权重 Weight	指标层 Index layer	权重(排序) Weight (sort)	指标极性 Index polarity
美学质量 Aesthetic quality	色彩特征 Color characteristics	0.4830	色相 Hue (C_1)	0.1411 (3)	逆 Negative
			饱和度 Saturation (C_2)	0.1022 (4)	正 Positive
			亮度 Brightness (C_3)	0.0983 (5)	正 Positive
			变色期时长 Discoloration period (C_4)	0.1413 (2)	正 Positive
	树形特征 Tree characteristics	0.3035	冠形 Crown shape (C_5)	0.1423 (1)	正 Positive
			树干清晰度 Trunk clarity (C_6)	0.0732 (8)	正 Positive
			冠幅 Crown width (C_7)	0.0880 (7)	正 Positive
	叶片特征 Leaf characteristics	0.2135	叶形 Leaf shape (C_8)	0.0937 (6)	正 Positive
			叶面积 Leaf area (C_9)	0.0588 (10)	正 Positive
			枝叶比 Ratio of branch mass to leaf mass (C_{10})	0.0609 (9)	逆 Negative

表2 乔木树种指标量化表
Table 2 Quantification of tree species index

评价指标 Evaluation index	红桦 <i>Betula albosinensis</i>	山杨 <i>Populus davidiana</i>	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	四川红杉 <i>Larix mastersiana</i>	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	云杉 <i>Picea asperata</i>	冷杉 <i>Abies faxoniana</i>	方枝柏 <i>Sabina saltuaria</i>
色相 Hue (°)	46	38	32	38	87	90	89	79
饱和度 Saturation (°)	68	79	84	61	45	53	45	34
亮度 Brightness (°)	78	78	76	56	40	40	39	40
冠形 Crown shape	1	1	4	2	3	2	2	2
树干清晰度 Trunk clarity	3	3	3	2	1	1	1	1
叶形 Leaf shape	3	3	1	2	2	2	2	2
变色时长 Discoloration period (t/d)	51	20	20	25	0	0	0	0
冠幅 Crown width (b/m)	6.4	6.65	2.44	3.9	6.45	4.5	5.1	4
叶面积 Leaf area (A/cm ²)	20	19	46	0.205	1.11	0.33	0.28	0.13
枝叶比 Ratio of branch mass to leaf mass (r/%)	3.45	5.35	2.13	5.15	1.67	1.49	1.35	2.24

橙黄色取色范围: 31°-45°; 黄色取色范围: 46°-60°; 叶绿色取色范围76°-90°。
Orange colour range: 31°-45°; yellow colour range: 46°-60°; leaf green colour range: 76°-90°.

表3 问卷调查人群基本信息

Table 3 Basic information about the questionnaire population

类型 Type	类别 Category	人数 Number	比例 Percentage
性别 Gender	女 Female	281	52.82%
	男 Male	251	47.18%
年龄 Age	18岁以下 Under 18 years old	94	17.67%
	18-30岁 18-30 years old	194	36.47%
	31-60岁 31-60 years old	194	36.47%
	61岁以上 over 61 years old	50	9.40%
学历 Education background	高中及以下 High school and below	198	37.22%
	大专、本科学历 Tertiary and undergraduate qualifications	231	43.42%
	硕士及以上 Master and above	103	19.36%
职业 Profession	园林、生态、景观相关工作 Gardening, ecology, and landscape related work	67	12.59%
	园林、生态、景观相关政府部门或管理部门 Government departments or administrations related to gardening, ecology, and landscape	20	3.76%
	其他 Other occupations	445	83.65%

的评价值,调查公众审美偏好以及专家经验值确定各指标的极性。具体公式如下:设 X_i ($i = 1, 2, \dots, 10$)为第*i*个评价指标的现状值, $X_{\max}$ 为评价指标的最大值, $X_{\min}$ 为评价指标的最小值, N_i 为评价指标的标准化值,其中 $N_i \in [0, 1]$ 。各树种的最终美学质量得分由标准化后各指标分数与相应指标的权重的乘积获得。

(1) 对于景观评价的正指标,其值越大,表示美学价值越高。 $N_i = X_i / X_{\max}$ 。

(2) 对于景观评价的逆指标,其值越大,表示美学价值越低。 $N_i = X_{\min} / X_i$ 。

2.5 美学质量空间格局

从2016年森林资源二类调查数据中提取研究区的植被类型分布图,利用ArcGIS软件空间制图和分析方法,将植被类型的空间分布与树种美学质量得分数据,形成九寨沟森林美学质量的空间分布栅格图件,其空间分辨率为30 m。由于本研究在ArcGIS中将研究区范围划分为30 m × 30 m的栅格,并且认为在每个栅格像元尺度上的森林植被为纯林,因而将其乔木层主要优势树种的美学得分作为该森林类型的美学值。此

外,基于等差法^[20]将美学质量得分按从高到低划分为I-IV共4个等级,分析美学质量空间分布规律。

为了详细分析九寨沟森林的美学质量分布与地形因子之间的关系,参考相关文献将海拔划分成<2 200 m、2 200-2 700 m、2 700-3 200 m、3 200-3 800 m、≥3 800 m共5段;将坡度划分为平坡(0°-5°)、缓坡(5°-15°)、斜坡(15°-25°)、陡坡(25°-35°)、急坡(35°-45°)、险坡(>45°)5个等级;坡向划分成北坡(337.5°-360°, 0°-22.5°)、东北坡(22.5°-67.5°)、东坡(67.5°-112.5°)、东南坡(112.5°-157.5°)、南坡(157.5°-202.5°)、西南坡(202.5°-247.5°)、西坡(247.5°-292.5°)和西北坡(292.5°-337.5°)8个坡向^[27]。利用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同类别地形因子之间的美学质量差异进行多重比较(Duncan法),探讨美学质量分布与地形因子的关系。海拔高程数据获取自地理空间数据云(<http://www.Gscloud.cn/>)下载的研究区域数字高程模型(DEM),其空间分辨率为30 m。坡度和坡向数据利用DEM数据在ArcGIS软件中运算所得。

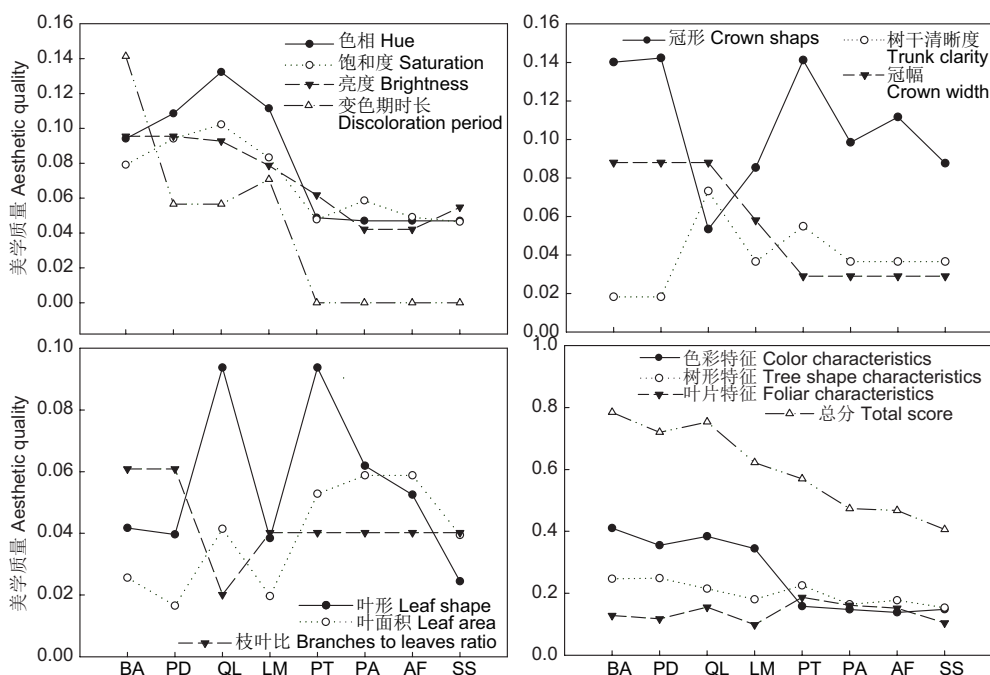


图2 美学质量与量化指标折线图。BA: 红桦; PD: 山杨; QL: 辽东栎; LM: 四川红杉; PT: 油松; PA: 云杉; AF: 冷杉; SS: 方知柏。

Fig. 2 Line chart of aesthetic quality and quantitative indicators. BA: *Betula albosinensis*; PD: *Populus davidiana*; QL: *Quercus liaotungensis*; LM: *Larix mastersiana*; PT: *Pinus tabulaeformis*; PA: *Picea asperata*; AF: *Abies faxoniana*; SS: *Sabina saltuaria*.

3 结果与分析

3.1 树种美学质量

保护区内主要乔木树种的美学质量值处于0.405 4-0.784 6之间,排序结果为红桦(0.784 6) > 辽东栎(0.753 7) > 山杨(0.720 3) > 四川红杉(0.622 2) > 油松(0.570 1) > 云杉(0.472 9) > 冷杉(0.467 1) > 方枝柏(0.405 4)。从图2可以看出,彩叶树种的色彩指标得分明显高于暗针叶树种;其中,红桦、辽东栎、山杨和四川红杉等彩叶树种得分均在0.6以上,具有较高的美学价值;而云杉、冷杉和方枝柏等常绿针叶树种的美学价值普遍较低,均小于0.5。

3.2 美学质量空间分布特征

3.2.1 美学质量的空间分布 根据等差法将植被美学质量进行等级划分,美学质量 > 0.75为I级, 0.6-0.75为II级, 0.45-0.6为III级, < 0.45为IV级后;可以看出I、IV级景观面积占比均为12%, II级面积占比最少,为4%, III级最多,占比达72%。研究区88%的森林景观位于I-III等级之间,说明九寨沟森林大部分面积的景观美学质量普遍较高。图3反映了其在空间的分布状况,可以看出,保护区内的I、II级景观主要分布在诺日朗群海以北及其分支日则沟沿线和扎如沟南侧,扎如沟北侧及九寨沟诺日朗海以南有零星分布;III级景观占据了森林的大部分面积,扎如沟、日则沟、则查洼沟两侧均有大量分布,IV级景观零星分布于日则沟、诺日朗群海以南的森林边缘区域。

3.2.2 美学质量与地形因子的关系 将美学质量与地形因子进行单因素方差分析发现,美学质量在不同海拔、坡向和坡度之间的分布存在明显差异($P < 0.01$)。如图4A所示,随着海拔的增加,美学质量呈现先增加后下降的趋势,在中等海拔(2 200-2 700 m)时最高。随着坡度的增加,美学质量略微呈升高趋势,其中急坡和险坡的美学质量高于其他坡度(图4B)。在坡向上表现为南坡(S)和东南坡(SE)的美学质量相对较高,而北坡(N)、西南坡(NW)和东北坡(SE)的美学质量较低(图4C)。

图5为不同等级的美学质量在不同地形因子上的分布情况。从图5A可以看出, I、II级美学质量主要分布在2 200-3 200 m海拔范围, III级主要分布在2 700-3 800 m海拔范围, IV级景观主要分布在3 200-3 800 m海拔范围内(图5A)。由图5B可见, I-IV级景观大多分布在陡坡和急坡范围内,其中I级和IV景观主要分布在陡坡, II-III级景观主要分布在急坡范围内。此外,各等级美学质量在不同坡向上的面积占比表现出明显的规律性,其中I-II级主要分布在西南方向, III-IV级主要分布

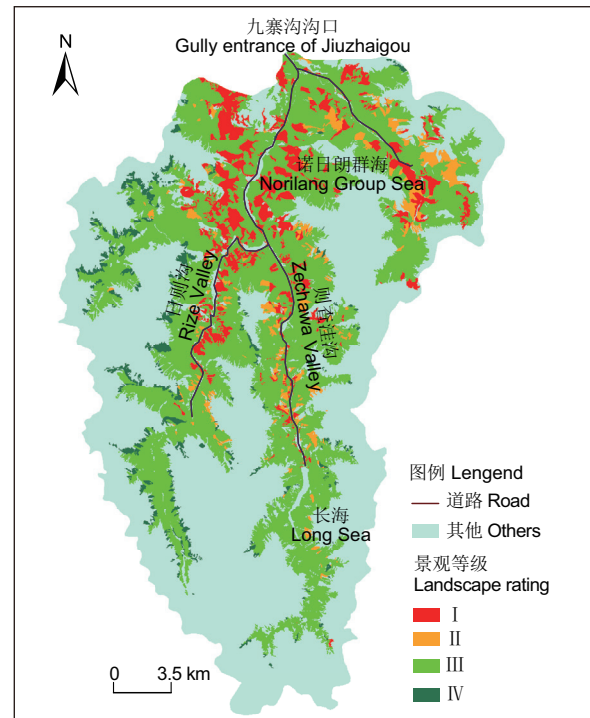


图3 九寨沟自然保护区景观美学质量等级空间分布格局。

Fig. 3 Spatial pattern of aesthetic quality level in Jiuzhaigou National Nature Reserve.

在东北方向(图5C)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 美学质量量化评价 在九寨沟秋季森林景观美学质量相关研究^[31]中,采用人眼辨别斑块色彩,可能会造成色彩量化指数的计算结果产生较大误差。本研究立足于现有研究,着眼于景观评价方法创新应用的诉求,基于传统几种评价方法的综合应用与创新,实现数字化的景观美学评价与分析。从生态可持续旅游视角,结合Delphi法和心理物理学方法尝试性提出一种新的景观美学评价量化方法,构建九寨沟自然保护区景观美学质量评价体系,基本达到预期研究目的。作为一种研究方法的探讨,本研究在指标选取和权重确定过程中不仅反映了森林景观环境本底特征的客观性,同时也采用问卷调查的方式获取公众对森林景观的主观偏好,实现了主、客观

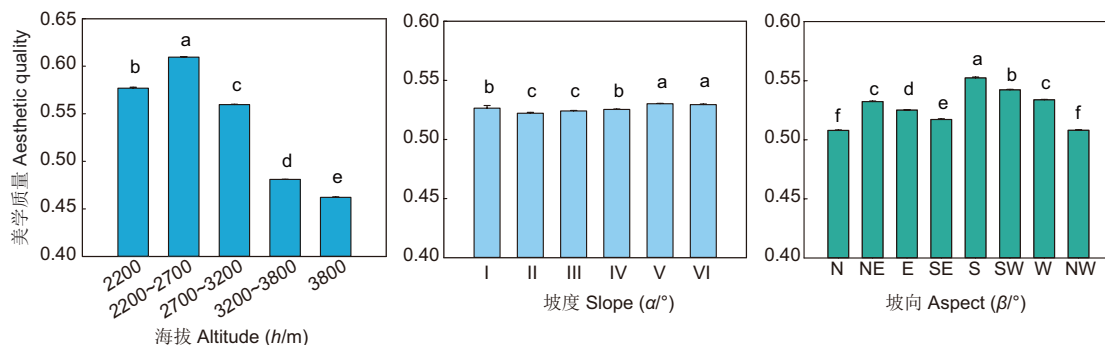


图4 不同地形因子海拔(A)、坡度(B)、坡向(C)的美学质量差异性比较(平均值±标准差)。不同字母表示显著差异($P < 0.01$),相同字母则表示无显著性差异。

Fig. 4 Comparison of differences in aesthetic quality among different elevations (A), slopes (B), and aspects (C) (mean ± standard deviation). Different letters indicate significant differences ($P < 0.01$) and the same letters indicate no significant differences.

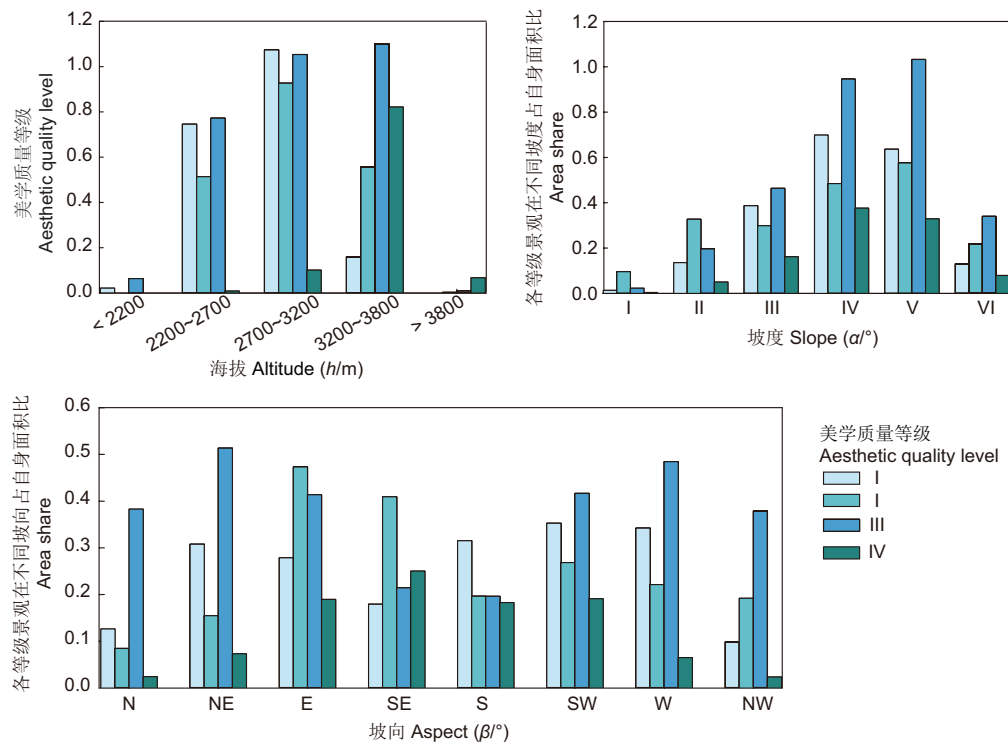


图5 不同海拔(A)、坡度(B)、坡向(C)上各美学质量等级占自身总面积的百分比。

Fig. 5 Area percentage of each aesthetic quality level in different elevations (A), slopes (B), and aspects (C).

相结合,定量评价了森林植被的美学质量,并在一定程度上弥补了以往忽略研究区域局限的问题,满足了结果客观化、信息化的实践要求。

4.1.2 美学质量与地形因子的关系 地形通过对温度、水分、光照等因素的再分配作用对山区植被空间格局分布产生决定性作用^[28-29],从而影响森林植被的美学质量空间分布。尤其是在我国川西亚高山地区,山地地形复杂多变,海拔落差巨大,剧烈的环境变化形成了复杂多样的环境因子组合,从而形成了多种森林植被类型,其中包括具有极高美学价值的彩林^[30]。本研究从空间分布视角,结合GIS技术,较为直观地解释了研究区全域范围内的景观美学分布规律,从较为新颖的角度有效评估了研究区的森林景观美学价值。结果表明森林景观美学质量较高的区域主要分布在2 200-3 200 m的海拔范围内,这可能是由于保护区在成立以前经历了森林砍伐,砍伐区域主要集中在中低海拔及道路沿线附近的区域,使得原生植被(云冷杉等寒温性针叶林)遭受到不同程度的破坏,从而逐渐在采伐迹地上形成了随着森林的自然演替恢复进程美学质量较高的次生林(如落叶阔叶林和四川红杉林)^[31]。而急坡和陡坡的美学质量较高的原因可能是由于研究区容易受到滑坡、泥石流以及地震等自然因素的干扰从而形成中小型林窗^[30-31],而这些林窗促进了山杨、辽东栎、桦木、四川红杉等喜光树种的生长与更新^[32],同时这些次生树种也构成了研究区内秋季绚丽多彩的彩林景观。西南方向的美学质量高于东北方向的原因可能与植被的坡向分异性有关^[33],坡向影响太阳辐射及蒸散作用从而影响植被空间分布^[34]。本研究区内的山杨、辽东栎、四川红杉等彩林树种均为喜光树种,耐荫性低,主要分布在坡向朝南的阳坡上;而云杉、冷杉等树种不喜光、耐荫性强,在坡向朝北的阴坡大面积分布。由于植被类型与美学质量紧密相关,因而植被空间上的分布差异影响了景观美学质量的空间布局格局。此外,从美学质量的空间分布上也可以看

出,具有较高美学质量的区域主要集中在道路两旁的低海拔处,这些区域恰好也处于沿道路观光的可视范围内,表明研究区大部分美学质量高值区域都具有可见性。由于研究区内的彩林主要分布在低海拔地区或路边这些易受到人为干扰的地方,因而这些区域的美学质量和视觉可达性都比较高。

4.1.3 研究方法的可行性与局限性 九寨沟乔木层秋色叶(红色、橙色、黄色)树种具有较高的美学质量,而其余树种的美学质量普遍较低,这说明色彩相比于其他特征(如形状、大小等)对视觉神经的刺激更为强烈^[33]。由此也可以看出,色彩特征在本研究美学质量评价体系中的重要性,这也在其他川西亚高山森林的美学研究中得到证实^[13]。色彩是景观的重要元素,也是最容易被直观感受的环境要素,对人的身心健康有着重要影响^[34]。此外,彩叶树种变色期越长其美学价值更高,这与以往研究结果^[13, 35]一致。这说明该评价体系可较好地用于树种美学价值的评价,同时可为九寨沟保护管理规划提供科学支撑,也可为我国自然保护区景观美学质量的评价提供案例参考。本研究的局限在于:一是缺乏对群落多样性景观效应的考虑,本文提出的基于物种属性的美学质量评价方法主要基于个体尺度,尚未考虑向林分或者景观尺度转化,由此可能带来一定的不确定性;二是选取的各项指标未涵盖所有能影响到主观评价的客观属性;三是未考虑物候期和季相对森林景观产生的影响^[13, 36]。

4.2 结论

九寨沟自然保护区内彩叶树种较常绿针叶树种的美学质量高,大部分森林景观的美学质量处于I-III级范围内,具有较高的观赏价值。美学质量的空间分异性明显,总体呈现北高南低的分布格局。美学质量受地形因子(海拔、坡度、坡向)的影响显著($P < 0.01$)。美学质量较高的区域主要分布在2 200-3 200 m的海拔范围内,更多分布在斜坡到急坡的范围内,阳坡的美学质量也要略大于阴坡。

本研究基于树种生物学特征构建了森林秋季景观美学质量评估体系,从森林植被角度评价了九寨沟自然保护区内的森林景观美学质量,通过定量解析九寨沟自然保护区美学质量空间变化与地形因子(海拔、坡度、坡向)的影响,从全新的视角探讨了美学质量的空间分布特征。然而,评价体系涉及

因素较为复杂,受到现有历史数据、资料可获得性及认识限制,本研究未能构建一套系统完善的、具有普适性的指标评价体系,未来需结合卫星遥感数据和空间分析技术探索更精确的阈值确定方法,建立更全面普适的景观美学质量评价体系,进一步提升森林美学服务价值。

参考文献 [References]

- 戴培超, 张绍良, 刘润, 杨永均. 生态系统文化服务研究进展——基于Web of Science分析[J]. 生态学报, 2019, **39** (5): 1863-1875 [Dai PQ, Zhang SL, Liu R, Yang YJ. Research progress of ecosystem cultural services – Based on web of science analysis [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39** (5): 1863-1875]
- 游彩云, 梅拥军. 论述国内外对森林景观美学评价的方法[J]. 科技信息, 2010 (19): 625-626 [You CY, Mei YJ. Discussed the evaluation methods for forest landscape aesthetics at home and abroad [J]. *Sci Technol Inf*, 2010 (19): 625-626]
- 李成, 李会云, 孔德义, 吴佳悻. 园林景观美景度评价研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, **47** (11): 10-12, 17 [Li C, Li HY, Kong DY, Wu JY. Research progress of scenic beauty estimation[J]. *J Anhui Agric Sci*, 2019, **47** (11): 10-12, 17]
- 廖艳梅. 福建省秋季风景林营建基础研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007 [Liao YM. Basic research on autumn landscape forest construction of Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007]
- 周根苗. 基于粗糙集的风景林景观美学评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008 [Zhou GM. The research on evaluating the scenic forest landscape aesthetic based on rough set [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2008]
- 李晖. 风景评价的灰色聚类——风景资源评价中一种新的量化方法[J]. 中国园林, 2002 (1): 14-16 [Li H. Gray clustering of evaluating landscape – A new quantification method of evaluating landscape resource [J]. *Chin Landsc Architect*, 2002 (1): 14-16]
- 杨汉奎. 论风景资源的模糊评价——以贵州省为例[J]. 自然资源学报, 1987 (1): 49-58 [Yang HG. An fuzzy appraisal mothod for scenic resources in Guizhou Province [J]. *J Nat Resour*, 1987 (1): 49-58]
- 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于SolVES模型的生态系统文化服务价值评估——以浙江省武义县南部生态公园为例[J]. 生态学报, 2018, **38** (10): 3682-3691 [Huo SG, Huang L, Yan LJ. Value evaluation of ecosystem cultural services based on solves model – Taking the southern ecological park in Wuyi County, Zhejiang Province as an example [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38** (10): 3682-3691]
- Meng S, Huang Q, Zhang L, He C, Inostroza L, Bai Y, Yin D. Matches and mismatches between the supply of and demand for cultural ecosystem services in rapidly urbanizing watersheds: a case study in the Guanting Reservoir basin, China [J]. *Ecosyst Serv*, 2020, **45**: 101156
- Kalinauskas M, Miksa K, Inacio M, Gomesa E, Pereira P. Mapping and assessment of landscape aesthetic quality in Lithuania [J]. *J Environ Manag*, 2021, **286**: 112239
- Atwa SMH, Ibrahim MG, Saleh AM, Murata R. Development of sustainable landscape design guidelines for a green business park using virtual reality [J]. *Sustain Cities Soc*, 2019, **48**: 101543
- Chen Y, Caesemaeker C, Rahman HMT, Sherren K. Comparing cultural ecosystem service delivery in dykelands and marshes using Instagram: a case of the Cornwallis (Jijuktu'kwejk) River, Nova Scotia, Canada [J]. *Ocean Coast Manag*, 2020, **193**: 105254
- 张小晶, 陈娟, 李巧玉, 刘锦春, 陶建平. 基于视觉特性的川西亚高山秋季景观林色彩量化及景观美学质量评价[J]. 应用生态学报, 2020, **31** (1): 45-54 [Zhang XJ, Chen J, Li QY, Liu JC, Tao JP. Color quantification and landscape aesthetic quality evaluation of subalpine autumn landscape forest in western Sichuan based on visual characteristics [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31** (1): 45-54]
- 赵秋月, 刘健, 余坤勇, 艾婧文, 上官莎逸, 项佳, 林月彬. 基于SBE法和植物组合色彩量化分析的公园植物配置研究[J]. 西北林学院学报, 2018, **33** (5): 245-251 [Zhao QY, Liu J, Yu KY, Ai JW, Shang GSY, Xiang J, Lin YB. Park plant configuration based on SBE method and quantitative analysis of color combination [J]. *J NW For Univ*, 2018, **33** (5): 245-251]
- Li Q, Du Y, Liu Y, Chen J, Zhang X, Liu J, Tao J. Canopy gaps improve landscape aesthetic service by promoting autumn color-leaved tree species diversity and color-leaved patch properties in subalpine forests of southwestern China[J]. *Forest*, 2021, **12**: 199
- Bossard CC, Cao Y, Wang J, Rose A, Tang Y. New patterns of establishment and growth of *Picea*, *Abies* and *Betula* tree species in subalpine forest gaps of Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, southwestern China in a changing environment [J]. *For Ecol Manag*, 2015, **356**: 84-92
- 刘少英, 章小平, 曾宗永. 九寨沟自然保护区的生态多样性[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007: 50-66 [Liu SY, Zhang XP, Zeng ZY. Ecological Diversity of Jiuzhaigou Nature Reserve [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2007: 50-66]
- Bossard CC, Cao Y, Wang J, Rose A, Tang Y. New patterns of establishment and growth of *Picea*, *Abies* and *Betula* tree species in subalpine forest gaps of Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, southwestern China in a changing environment [J]. *For Ecol Manag*, 2015, **356**: 84-92
- Howley P. Landscape aesthetics: assessing the general publics' preferences towards rural landscapes [J]. *Ecol Econ*, 2011, **72**: 161-169
- 章志都, 徐程扬, 龚岚, 蔡宝军, 李翠翠, 黄广远, 李波. 基于SBE法的北京市郊野公园绿地结构质量评价技术[J]. 林业科学, 2011, **47** (8): 53-60 [Zhang ZD, Xu CY, Gong L, Cai BJ, Li CC, Huang GY, Li B. Assessment on structural quality of landscapes in green space of beijing suburban parks by SBE method [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47** (8): 53-60]
- 郑万钧. 中国树木学[M]. 南京: 江苏人民出版社, 1961: 6-9 [Zheng WJ. Chinese Dendrology [M]. Nanjing: Jiangsu People's Publishing House, 1961: 6-9]
- 李扬汉. 植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1958: 5-7 [Li YH. Botany [M]. Beijing: Higher Education Press, 1958: 5-7]
- 蓝振江. 九寨沟陆生植物群落的生物量和生产力研究[D]. 四川: 四川大学, 2004 [Lan ZJ. A study on the biomass and productivity of main terrestrial community at the Jiuzhaigou Valley [D]. Sichuan: Sichuan University, 2004]
- Yin C, Palmroth S, Pang X, Tang B, Liu Q, Oren R. Differential

- responses of *Picea asperata* and *Betula albosinensis* to nitrogen supply imposed by water availability [J]. *Tree Physiol*, 2018, **38**: 1694-1705
- 25 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015 (2): 12-15 [Zhu XA, Wei GD. Discussion on the excellent standard of dimensionless method in entropy method [J]. *Stat Decis*, 2015 (2): 12-15]
 - 26 焦贝贝, 石培基, 刘春芳, 陈莉, 刘海猛. 黄土高原低山丘陵区农村居民点分布与地形因子关系研究——以兰州市七里河区为例[J]. 资源科学, 2013, **35** (8): 9 [Jiao BB, Shi PJ, Liu CF, Chen L, Liu HM. The distribution of rural settlements in relation to land form factors in low hilly land on the Loess Plateau [J]. *Resour Sci*, 2013, **35** (8): 9]
 - 27 李雪莹, 齐童, 张国庆, 赵晨旭. 国内外景观美学研究综述[J]. 黑龙江科技信息, 2016 (24): 261-262 [Li XY, Qi T, Zhang GQ, Zhao CX. A review on landscape aesthetic research at home and abroad [J]. *Sci Technol Innov*, 2016 (24): 261-262]
 - 28 Liu J, Zou H, Bachelotet B, Dong T, Zhu Z, Liao Y, Plenковиć-Moraj A, Wu Y. Predicting the responses of subalpine forest landscape dynamics to climate change on the eastern Tibetan Plateau [J]. *Glob Chang Biol*, 2021, **27**: 4352-4366
 - 29 吴庆贵, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 杨玉莲, 倪祥银, 何洁. 川西高山森林林隙特征及干扰状况[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (6): 922-928 [Wu QG, Wu FZ, Yang WQ, Tan B, Yang YL, Ni XY, He J. Characteristics of gaps and disturbance regimes of the alpine fir forest characteristics of gaps and disturbance regimes of the alpine fir forest in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (6): 922-928]
 - 30 Yang WQ, Wang KY, Kellomaki S, Gong HD. Litter dynamics of three subalpine forests in western Sichuan [J]. *Pedosphere*, 2005, **15** (5): 653-659
 - 31 杜婷, 刘一霖, 杨玉婷, 张玉, 游成铭, 张丽, 谭波, 徐振锋, 李晗. 林窗对川西亚高山6种植物凋落叶纤维素降解的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27** (3): 617-24 [Du T, LiuYL, Yang YT, Zhang Y, You CM, Zhang L, Tan B, Xu ZF, Li H. Effects of forest gaps on cellulose degradation during foliar litter decomposition in a subalpine forest of western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, **27** (3): 617-24]
 - 32 吴彦, Onipchenko VG. 雪被对川西高山植被坡向性分异的影响[J]. 生态学报, 2007 (12): 5120-5129 [Wu Y, Onipchenko V G. The impact of snow-cover on alpine vegetation type of different aspects in the West of Sichuan Province [J]. *Acta Ecol Sin*, 2007 (12): 5120-5129]
 - 33 张喆, 鄯光发, 王成, 姜莎莎. 多尺度植物色彩表征及其与人体响应的关系[J]. 生态学报, 2017, **37** (15): 5070-5079 [Zhang Z, Qie GF, Wang C, Jiang SS. Plant colors at multiple scales and their effects on humans[J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (15): 5070-5079]
 - 34 Swetnam RD, Harrison-Curran SK, Smith GR. Quantifying visual landscape quality in rural Wales: a GIS-enabled method for extensive monitoring of a valued cultural ecosystem service [J]. *Ecosyst Serv*, 2016, **26**: 451-464
 - 35 王丽华, 李波, 陈文凯, 贺俊东, 刘意元, 王文鑫, 唐淑琴, 吴彦. 亚高山野生乡土木本植物观赏价值评价体系构建[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27** (3): 541-548 [Wang LH, Li B, Chen WK, He JD, Liu YY, Wang WX, Tang SQ, Wu Y. Construction and analysis of the ornamental value evaluation system of wild native woody plants in a subalpine region [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2021, **27** (3): 541-548]
 - 36 陶泽兴, 葛全胜, 王焕炯, 戴君虎. 中国中东部植被景观观赏季划分的物候学基础[J]. 地理学报, 2015, **70** (1): 85-96 [Tao ZX, Ge QS, Wang HJ, Dai JH. Phenological basis for determination of ornamental tourism season in China [J]. *Acta Geogr Sin*, 2015, **70** (1): 85-96]